

「限界を超えた Ia 型超新星」の起源を解明 ～国内外の望遠鏡を連携（光・赤外線天文学大学間連携） した観測により爆発前の星の特徴をつかんだ～

本研究のポイント

- ・ 非常に明るい『限界を超えた Ia 型超新星』の起源は謎であった。
- ・ 『限界を超えた超新星』SN 2012dn から強い赤外線が放射されていることが発見された。
- ・ これにより、起源天体が白色矮星と通常の星からなる連星系である証拠を史上初めて突き止めた。
- ・ 京都大学・理学研究科・宇宙物理学教室の前田啓一（准教授）および長尾崇史（博士後期課程一年）らは超新星の起源に応じ異なる赤外線放射が現れるという理論予測を提出していた。
- ・ 甲南大学の山中雅之（平生太郎基金研究員、元京都大学・花山天文台研究員）は『限界を超えた超新星』SN 2012dn の観測を主導した。
- ・ 観測は、国内外の望遠鏡を連携して天体観測をする枠組みである「光・赤外線天文学大学間連携」を通じて行われた。京都大学・理学研究科・宇宙物理学教室からは野上大作（准教授）が中心メンバーの一人として光・赤外線天文学大学間連携の組織運営にあたっている。

要旨

このたび甲南大学理工学部物理学科の山中雅之・平生太郎基金研究員（元京都大学・花山天文台研究員）、京都大学理学研究科宇宙物理学教室の前田啓一・准教授、長尾崇史・博士後期課程一年、野上大作・准教授らの研究グループは、日本の光・赤外線天文学大学間連携を通じた共同研究によって、『限界を超えた超新星』の爆発前の姿を明らかにしました。Ia(イチエー)型超新星は遠方銀河の距離を精密に測定する道具として使われてきたにも関わらず、『限界を超えた超新星』の発見などにより、30年以上にわたりその起源について長い論争が続いていました。今回、山中雅之研究員・前田啓一准教授を中心とする当研究グループはSN 2012dn という『限界を超えた超新星』の徹底観測によって、通常では見られないような非常に強い赤外線放射を捉えることに成功しました。前田啓一准教授・長尾崇史博士後期課程一年らが提出していた赤外線放射の理論予測をもとにした詳細な解析の結果、この赤外線放射は爆発する前の天体からの放出物由来であることがわかり、長年未解決であった起源天体の正体を明らかにすることができました。本研究成果は、『Publication of the Astronomical Society of Japan』オンライン版に2016年5月18日付で掲載されました。

論文タイトル : OISTER optical and near-infrared observations of the super-Chandrasekhar supernova candidate SN2012dn: dust emission from the circumstellar shell

著者 : Masayuki YAMANAKA, Keiichi MAEDA, Masaomi TANAKA, Nozomu TOMINAGA, Koji S. KAWABATA, Katsutoshi TAKAKI, Miho KAWABATA, Tatsuya NAKAOKA, Issei UENO, Hiroshi AKITAYA, Takahiro NAGAYAMA, Jun TAKAHASHI, Satoshi HONDA, Toshihiro OMODAKA, Ryo MIYANOSHITA, Takashi NAGAO, Makoto WATANABE, Mizuki ISOGAI, Akira ARAI, Ryosuke ITOH, Takahiro UI, Makoto UEMURA, Michitoshi YOSHIDA, Hidekazu HANAYAMA, Daisuke KURODA, Nobuharu UKITA, Kenshi YANAGISAWA, Hideyuki IZUMIURA, Yoshihiko SAITO, Kazunari MASUMOTO, Rikako ONO, Ryo NOGUCHI, Katsura MATSUMOTO, Daisaku NOGAMI, Tomoki MOROKUMA, Yumiko OASA, and Kazuhiro SEKIGUCHI

doi : 10.1093/pasj/psw047

《本研究の共同研究者一覧》

山中雅之 (甲南大学)、前田啓一 (京都大学)、田中雅臣 (国立天文台)、富永望 (甲南大学)、川端弘治、高木勝俊、川端美穂、中岡達也、上野一誠、秋田谷洋 (以上、広島大学)、永山貴宏 (鹿児島大学)、高橋隼、本田敏志 (以上、兵庫県立大学)、面高俊宏、宮ノ下亮 (以上、鹿児島大学)、長尾崇史 (京都大学)、磯貝瑞希 (国立天文台)、新井彰 (京都産業大学)、伊藤亮介、宇井崇紘、植村誠、吉田道利 (以上、広島大学)、花山秀和、黒田大介、浮田信治、柳澤顕史、泉浦秀行 (以上、国立天文台)、齊藤嘉彦 (東京工業大学)、増本一成、小野里佳子、野口亮、松本桂 (以上、大阪教育大学)、野上大作 (京都大学)、諸隈智貴 (東京大学)、大朝由美子 (埼玉大学)、関口和寛 (国立天文台)

二重下線は本論文の筆頭 (責任) 著者、下線は京都大学理学研究科宇宙物理学教室所属の研究者および大学院生。

1. 背景

la(イチエー)型超新星(*1)は、銀河に匹敵するような明るさ(*2)で輝き、かつどの天体でもほとんど同じ明るさであることが知られています(以下、la型超新星を単に超新星と書くことがあります)。さらに、明るさの変化が緩やかである程、より超新星が明るく輝くことが知られています。これらの性質によって、銀河までの距離を正確に測定することが可能です。1990年代後半、パールムッター、リース、シュミット博士らは、このla型超新星を用いて宇宙が加速膨張していることを明らかにしました。彼らはその業績を讃えられ、2011年ノーベル物理学賞を受賞しました(*3)。

しかしながら、その重要性にも関わらず、その起源については二つの星が周り合う連星系であること以外未だに明らかになっていません。現在、爆発へ至るシナリオは大きく二つの候補が考えられていますが、30年以上にわたる長い年月の間、論争が続いています。「降着説」と「合体説」です。片方が白色矮星、もう一方が通常の恒星である場合、白色矮星への物質降着が起こります。これによって、限界質量に到達し爆発に至る道筋が考えられます。これを「降着説」と呼び、超新星を説明する従来からの有力なシナリオでした。しかしながら、限界質量を超えた白色矮星の爆発でなければ説明が困難な特異な超新星爆発(以降、『限界を超えた超新星』)が数例発見されました(*4)。当研究員らも2009年に一例について観測研究の成果を発表しています。そのような『限界を超えた超新星』は従来の標準的な「降着説」では簡単に説明することができません。一方で、「降着説」ではなく、二つの白色矮星の連星であり、重力波放出によって互いの距離が近づき最終的に激しい合体を起こして、一気に限界質量を超え、爆発に至る「合体説」もであれば容易に説明可能であるという提案もあります。果たして爆発起源の正体は何なのか、その解決が待たれていました。

2. 研究成果

2012年、『限界を超えた超新星』候補であるSN 2012dn(*5, 図2)が発見されました。この天体は、これまでの同種の超新星で最も我々に近く、詳細な観測が可能であることが期待されました。そこで、山中研究員らはこの天体が天文学的にとても価値が高いものであると判断し、光・赤外線天文学大学間連携(図1)を通して11台もの望遠鏡を総動員し、爆発初期からの観測を実施しました。この観測は、開始してから西方側に沈む限界までの150日にも渡るものとなりました。

特に、近赤外線波長域に関しては、全く新しい情報が得られるのではないかと期待されました。前田啓一准教授、長尾崇史博士後期課程一年らは超新星の起源に応じ異なる近赤外放射が現れることを予測していました(*6)。「降着説」では、連星をなす相手の恒星からのガスが白色矮星に降り積もり、限界質量に到達するかあるいは超えて爆発に至りますが、降着の過程で二つの星の周囲にも重力圏から脱出して物質が放出されてしまいます。つまり、超新星爆発は濃い塵を含んだガス雲中で発生することになります。一方で、「合体説」では、白色矮星が二つ形成されて後、合体衝突に至るまで非常に長い時間かかってしまうことが知られています。このため、合体前に周囲に放出されたガスはほとんど無くなります。「降着説」のように濃い物質中で超新星が発生した場合、周囲の物質(爆発前に放出された物質)を超新星からの光が照らすことで、この物質が赤外線ですごく強く光ることが予想されました。

山中研究員らの主導した観測の結果、通常の超新星では見られない強い赤外線放射を捉えることに成功しました。山中研究員・前田准教授らは、その起源を詳細に解析し、上記の理論予測のように超新星として爆発する前に起源天体から放出された物質がこの赤外線放射を出していることを突き止めました。超新星からの放射によって放出物が温められ、赤外線放射を出していたのです。また、超新星から放出物までの距離は0.2光年程度であることを明らかにしました(図3)。「限界を超えた超新星」において爆発前の天体由来の放射が検出されたのは初めてのことです。その放出率を見積もったところ、従来からの有力候補の一つである「降着説」を強く支持するものであることがわかりました(図4)。

3. 今後の期待

本研究は『限界を超えた超新星』の起源を明らかにした史上初めての研究成果となり、多様な分野へのインパクトが期待されます。『限界を超えた超新星』と、そうでない典型的な超新星の起源は異なるものであるのか、同一起源であるのか、さらなる研究が加速されるでしょう。通常のIa型超新星からの赤外放射は現在まで検出されていませんが、これは通常の超新星に対して「降着説」を否定するものではありません。「降着説」でも様々な量の爆発前放出物質が予想され、『限界を超えた超新星』SN 2012dnにおいては非常に大量の放出物質があったため強い赤外線を放射したと考えられます。「降着説」でも比較的放出物質の量が少ない場合はこれまでの観測では検出できません。今後、様々な超新星に対しより精度の良い赤外観測を長期間にわたって行うことが重要となります。京都大学宇宙物理学教室が岡山に建設中の3.8m新技術望遠鏡はこの目的のためにうってつけの望遠鏡になると期待されます。

また、どのような理由から白色矮星が限界質量を超えるのかも明らかにされなければなりません。「降着説」の枠組みでは、高速回転することによって限界質量を超えるというシナリオが提案されていますが、そのような天体の観測例は未だありません。

さらに、Ia型超新星を使った宇宙加速膨張の研究においても注意が必要となると考えられます。『限界を超えた超新星』は宇宙膨張の加速度測定サンプルから除かれなければいけませんが、今回その起源が理解されたことでこの混入を精度よく排除できるかもしれません。また、『限界を超えた超新星』の観測的性質をよく深く理解することは通常の超新星の起源の理解につながり、それは宇宙膨張の加速をより精密に決定することにつながると期待されます。

《用語解説・補足》

(*1) Ia型超新星：超新星爆発は、そのスペクトル(光を波長に分解する観測)によって分類がなされます。スペクトルでは、膨張している大気に含まれる元素を調査することができます。水素とヘリウムが無く、ケイ素や鉄と言った比較的重い元素が豊富に含まれる場合、Ia型と分類されます。

(*2) 明るさ：天体の明るさには、二種類あります。地球から観測される見かけの明るさは単に、見かけの明るさと呼ばれます。また、その天体までの距離を考慮して単位時間・単位面積あたりの光の強さに換算されたものが、絶対的な明るさと呼ばれます。

(*3) Ia型超新星の場合、絶対的な明るさがわかっているために、見かけの明るさとの比から銀河までの距離を見積もることができます。Ia型の絶対的な明るさを求める関係式はフィリップス関係と呼ばれ、フィリップス博士により1990年代に発見されたものです(Phillips 1993, *The Astrophysical Journal*, 413, L105; Phillips et al. 1000, *Astronomical Journal*, 118, 1766)。この関係を用いて多数の超新星への距離を見積もるという手法により、パールムッター、リース、シュミット博士らは宇宙の加速膨張を発見しました(2011年度ノーベル物理学賞; Permuter et al., *The Astrophysical Journal*, 517, 565; Riess et al., *Astronomical Journal*, 1998, 116, 1009)。

(*4) 白色矮星：地球程度の大きさに太陽程度の質量が詰め込まれた、とても密度の高い星です。相対性理論・量子力学に基づいた限界質量を持ちます。もう一つの星からのガスの降着によって、限界質量に達して爆発に至ると考えられており、そのため超新星の明るさも似ると考えられています。一方で、非常に明るく限界質量を超えたような質量の白色矮星の爆発と考えなければ説明できないような『限界を超えた超新星』が2000年代から知られるようになりました。中でも典型的な『限界を超えた超新星』であるSN 2009dcの詳細な観測は山中雅之研究員や田中雅臣国立天文台助教を中心とした研究グループにより行われ(Yamanaka et al. 2009, *The Astrophysical Journal*, 707, L118; Tanaka et al., 2010, *The Astrophysical Journal*, 714, 1209)、『限界を超えた超新星』が限界質量を超えた白色矮星の爆発であることが確立しました。

(*5) SN 2012dn：2012年7月8日に地球からおよそ1億3000万光年の距離にある銀河ESO462-G016(いて座・やぎ座の境界付近方向にある銀河)で発見された超新星です。海外からの報告によって、増光途中の『限界を超えた超新星』に非常に類似している可能性が指摘されました。

(*6) 「降着説」において爆発前に放出された物質が超新星の光を吸収し温められ近赤外線で光するという理論予測は前田啓一准教授、長尾崇史博士後期課程一年らにより2015年に発表されました(Maeda et al., 2015, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452, 3281)。通常のIa型超新星ではこれまで赤外放射が検出されておらず、「降着説」のなかでも特に爆発前に激しい物質放出をするような系は通常の超新星の起源として否定されていました。今回のSN 2012dnからの強い赤外放射は「降着説」の中でも特に激しく質量放出をした系が起源であるとして理解されます。

《添付資料》



Credit: OISTER web

図 1 光・赤外線天文学大学間連携に参加している各大学の望遠鏡群。これらのうち本研究において SN 2012dn の徹底観測に参加した観測機関は、国立天文台岡山天体物理観測所、同天文台石垣島天文台、広島大学、鹿児島大学、北海道大学、東京工業大学、名古屋大学、兵庫県立大学、京都産業大学です。また、大阪教育大学も観測に参加しました。京都大学李白研究科宇宙物理学教室からは野上大作准教授が主要メンバーの一人として運営に携わっています。

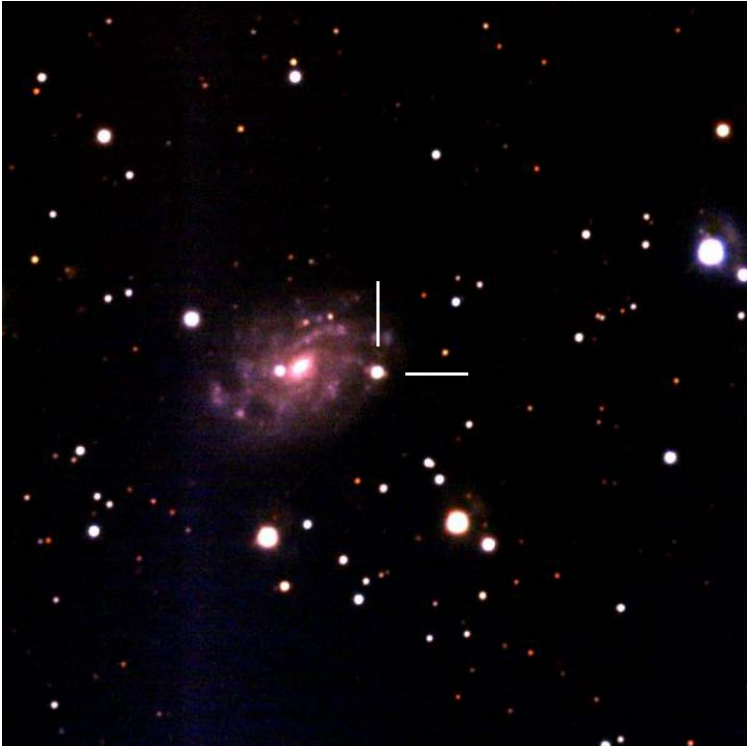


図 2 広島大学 1.5m かなた望遠鏡で取得された超新星爆発 SN 2012dn の星野画像。画像中央に SN 2012dn が見えています（白線で示した明るい天体）。また、超新星の存在している母銀河 ESO 462-016 が左側に見えています。この銀河までの距離は、1 億 3000 万光年と知られています。超新星はただの点源で、膨張で広がっていく姿を捉えることはできませんが、明るさや色などの変化を追うことが可能です。

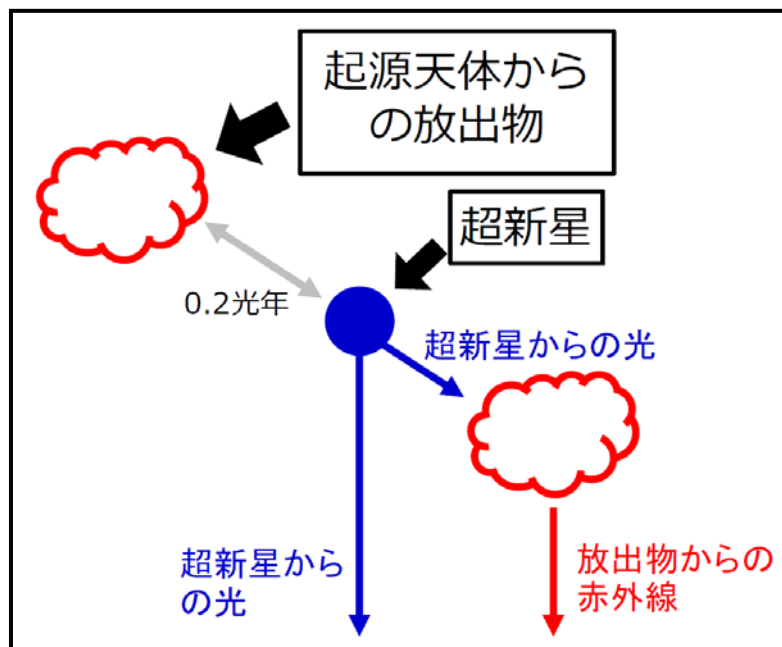


図 3 強い赤外線放射を引き起こしていると考えられる起源天体からの放出物の想像図。放出物は、起源天体が、超新星爆発を起こす以前に出したものです。放出された物質は、超新星からの放射（光）によって温められ、再び我々の方向に赤外線放射を出しています。本研究によって、超新星から放出物までの距離は 0.2 光年程度であることが明らかとなりました。

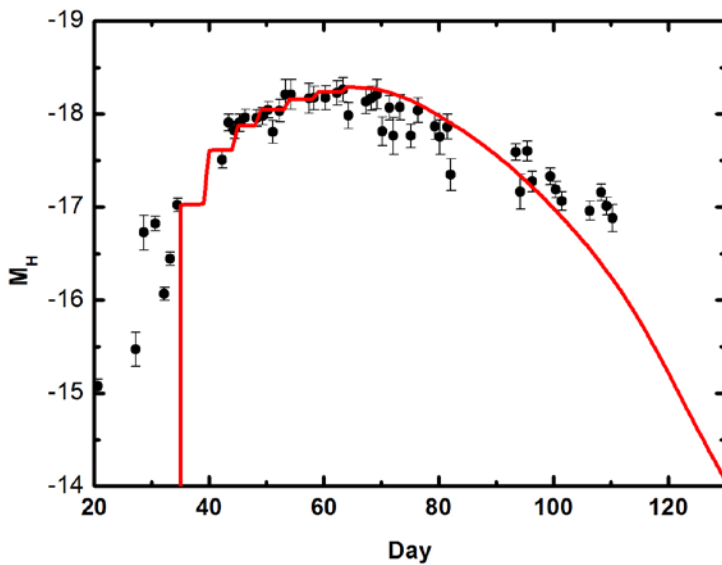


図4 超新星 SN2012dn の近赤外超過成分の光度曲線（黒点）と理論予測（赤線）との比較。この図に示した光度曲線は超新星本体からの近赤外放射を差し引いた残りの成分を表しています。理論モデルは、中心から 0.18 光年を内縁としたリング状に分布した放射物質が超新星からの光で温められた場合の光度曲線であり（図5右図）、爆発前の質量放出率は年間 3.5×10^{-6} 太陽質量です。

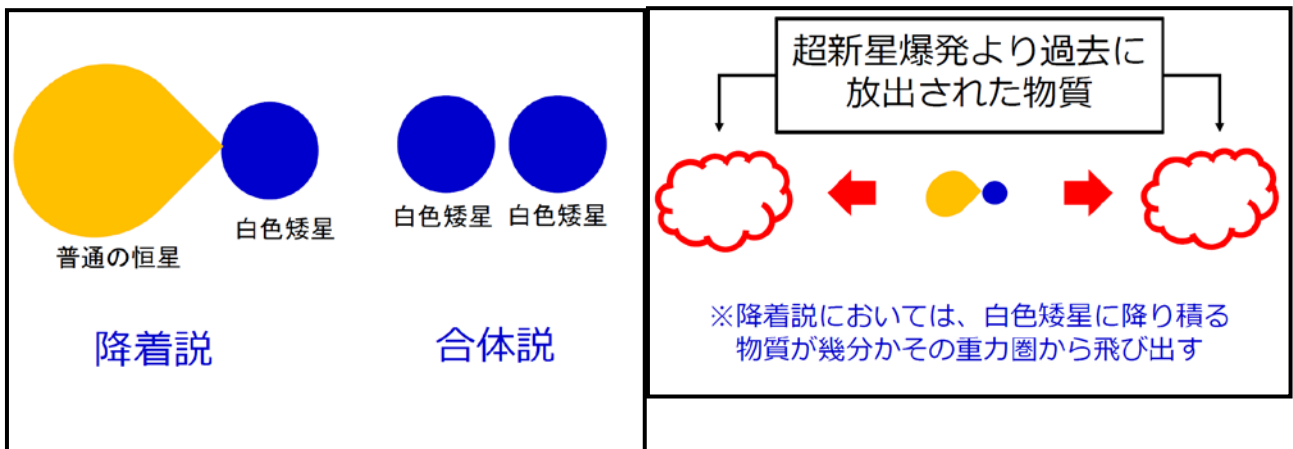


図5 『限界を超えた超新星』の起源天体として考えられてきた二つのシナリオの想像図（左図）。どちらも非常に近い距離（例えば、太陽半径の数倍程度）で互いに回り合っている連星系です。今回、我々が捉えた放出物は、隣の普通の恒星から降り積る際に、重力圏から脱出したガスであり、これは、「降着説」でなければ説明できません（右図）。